

国家自然科学基金项目资助 (40174010、40244021)

# 深部开采 动力灾害机理与超前辨识

● 李 铁 郝相龙 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



国家自然科学基金项目资助(40174010、40244021)

# 深部开采 动力灾害机理与超前辨识

李 铁 郝相龙 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

本书针对我国煤矿深部开采的动力灾害问题,介绍了作者在深部开采理论,区域构造应力场的调制作用,冲击地压、矿震、突水和外部动力作用下煤与瓦斯突出等动力灾害机理与超前辨识方面的工程实践和理论认识,侧重动力灾害的超前辨识或预测方面的研究成果。

本书可供采矿、矿山安全科学与工程、矿山防灾减灾工程、地球物理等专业的师生和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

深部开采动力灾害机理与超前辨识/李铁,郝相龙著.

徐州:中国矿业大学出版社,2009.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0554 - 4

I. 深… II. ①李…②郝… III. 煤矿—灾害防治—研究

IV. TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第227374号

书 名 深部开采动力灾害机理与超前辨识

著 者 李 铁 郝相龙

责任编辑 杨 廷 李 敬

责任校对 何晓惠

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: [cumtpvip@cumtp.com](mailto:cumtpvip@cumtp.com)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 8.375 字数 216 千字

版次印次 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

煤矿开采产生的动力灾害严重威胁采矿工程安全。为此,在最近的半个世纪里,国内外众多学者和科技人员在动力灾害的观测技术、发生与破坏机理、危险性评价与预测、危害性评估和防御、减轻与控制灾害技术等方面开展了大量卓有成效的研究工作,奠定了指导生产实践的理论基础和应用技术,为采矿业的安全作出了重大贡献。

进入深部开采后,面临高原岩地应力、高采动次生应力、高瓦斯吸附压力、高瓦斯含量和煤层低透气性等新的不利开采环境,加之采动岩体力学行为的非线性特征趋于显著,岩体对开采扰动和外部动力响应的敏感程度增加,导致采煤环境和条件恶化、煤岩与瓦斯等动力灾害复杂、灾害防治难度加大、采煤成本增加、突发性和重大工程灾害的威胁加重。

深部煤炭资源是我国 21 世纪及以后的主要后备能源保障。煤、岩、瓦斯等动力灾害的严重程度与开采深度呈正相关甚至非线性增强的发展态势,岩体采动的非线性响应使得冲击地压、岩爆和矿震的机理变得更为复杂,冲击地压和煤与瓦斯突出灾害间的相互作用凸显,矿震及强烈地震应力场对深井煤矿动力灾害的诱发作用增强,采空区不明来源水体的蓄积和成灾难以及时察觉。深部煤炭开采的动力灾害是威胁深部采矿安全和制约煤炭开采业可持续发展的重大工程问题。动力灾害机理和防治技术的探索,既是当前深部煤炭资源开采的迫切需要,又将是学术界与工程界长期的重要任务。

科学观测是认识自然现象与动力灾害的基础。与浅部相比,

更不易通过常规的矿压观测方法获取深部岩体的采动响应,从而制约了对动力灾害机理的认识和动力灾害源的超前辨识或预测,导致灾害防御与治理的针对性和有效性降低。地球物理技术在观测深部岩体动力响应方面具有得天独厚的优势,将发挥越来越重要的作用。学科交融是认识复杂科学问题的重要途径,采矿学、岩石力学和地球物理学的交叉与融合将有益于深部开采动力灾害机理的认识、动力灾害超前辨识和减轻与控制动力灾害。

在国家自然科学基金资助下(项目批准号:40174010、40244021),作者在抚顺煤田建立矿山地球物理观测系统,开展了深井煤矿动力灾害观测技术和灾害机理的探索。此后,又与平顶山煤业集团、义马煤业集团、华亭煤业集团等矿山企业合作,开展了旨在解决现场动力灾害危险性预测与防治的成果应用研究,并对不同类型灾害的机理开展了进一步探索。

本书的研究工作是应用地球物理与岩石力学相结合的方法认识煤矿动力灾害,汇集了作者在深部开采动力灾害防治领域的工程实践和理论探索,对部分学者的相关研究成果进行了概要介绍,希望为我国煤矿认识深部开采动力灾害机理、灾害超前辨识(预测)和灾害防治提供有益的借鉴。

本书的研究工作在国家自然科学基金委员会支持的项目基础上逐渐展开。第一作者的研究工作得到导师北京大学蔡美峰教授的悉心指导。中国工程院院士许绍燮,中国地震局地球物理研究所研究员张少泉、李世愚,加拿大劳伦森大学地质力学研究中心(Geomechanics Research Centre, Laurentian University)蔡明博士,抚顺矿业集团孙学会、吕毓国、刘军,平顶山煤业集团卫修君、张福旺,华亭煤业集团乔中栋、周澎,北京大学纪洪广、王金安教授等,对本书的研究工作提供了有益的探讨、宝贵的资料和无私的帮助。北京大学、抚顺市地震局、抚顺矿业集团、平顶山煤业集团、义马煤业集团、华亭煤业集团、阜新市地震局及相关人员

## 前 言

---

合作开展研究并提供了大力支持与帮助。谨致诚挚谢忱!

由于灾害复杂、研究工作时间短,有些成果尚不成熟,加之作者的学识水平所限,缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2009 年 10 月

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 前言 .....                             | 1   |
| 第一章 中国的冲击地压、岩爆和矿震概述 .....            | 1   |
| 第一节 冲击地压、岩爆和矿震的概念 .....              | 2   |
| 第二节 我国冲击地压、岩爆和矿震的总体分布 .....          | 4   |
| 第三节 冲击地压、岩爆和矿震分区概述 .....             | 5   |
| 第四节 采动岩体微震事件的分类 .....                | 35  |
| 第五节 矿山冲击震动灾害研究的趋势 .....              | 48  |
| 第二章 煤矿开采动力响应揭示的特征深度 .....            | 53  |
| 第一节 深部开采的“临界深度” .....                | 53  |
| 第二节 采动微震破裂源的三个特征深度 .....             | 65  |
| 第三节 煤与瓦斯突出揭示的特征深度 .....              | 77  |
| 第三章 矿区的边界应力条件 .....                  | 100 |
| 第一节 现今构造应力场中长周期调制作用型煤田 .....         | 101 |
| 第二节 残余构造应力释放型煤田 .....                | 104 |
| 第三节 现今构造应力场短期调制作用型煤田 .....           | 108 |
| 第四章 基于微震观测的采动弹性能释放趋势评价 .....         | 112 |
| 第一节 采动微震震级—频次自相似关系的力学机理与<br>应用 ..... | 112 |

|      |                                   |     |
|------|-----------------------------------|-----|
| 第二节  | 采动微震分形特征揭示的采矿系统特征与<br>震危险性评价····· | 124 |
| 第三节  | 分层开采煤矿的岩体弹性能释放模型与<br>能量释放谱·····   | 148 |
| 第五章  | 基于微震观测的矿震与突水危险性预测·····            | 161 |
| 第一节  | 强矿震的岩体破裂弹性波前兆信息·····              | 161 |
| 第二节  | 加卸载响应比理论在矿震预测中的应用·····            | 168 |
| 第三节  | 强矿震的力学过程及预测·····                  | 176 |
| 第四节  | 地下不明水体突水灾害超前辨识的地球<br>物理方法·····    | 191 |
| 第六章  | 深部开采外部动力与瓦斯耦合型灾害·····             | 203 |
| 第一节  | 深部开采冲击地压和矿震与瓦斯的相关性·····           | 203 |
| 第二节  | 远场地震应力诱发煤矿瓦斯异常涌出的<br>机理·····      | 211 |
| 第三节  | 外部动力作用下的煤与瓦斯动力灾害机理·····           | 221 |
| 参考文献 | ·····                             | 232 |



## 第一章 中国的冲击地压、岩爆和矿震概述

矿产资源开采易引发冲击地压、岩爆和地震(简称矿震)等煤岩动力灾害。1738年,英国南斯坦福煤田报道首例冲击地压,但直到19世纪80年代后,西欧许多国家的煤矿才开始陆续发生冲击地压。苏联的基泽洛夫矿区于1947年发生了该矿区的第一次冲击地压,随后库兹涅茨、滨海、中亚细亚、特克布尔、伯绍拉和波里等煤矿先后发生冲击地压。德国的鲁尔、多特蒙德煤矿区和Potash钾盐矿区的冲击地压和矿震比较典型。波兰的上西里西亚是该国煤矿冲击地压和矿震最严重的地区,1958年在该矿区的卡托维茨矿首次记录了冲击地压,而该矿区目前仍有发生。卢宾铜矿的岩爆和矿震世界闻名。世界上一次性致亡人数最多的矿震于1960年1月20日发生在南非的Coalbroek North煤矿,此次矿震造成300万 $\text{m}^3$ 顶板塌陷,437人罹难。南非的金矿是世界上岩爆和矿震危害最大的硬岩矿山,仅1975年31个金矿就造成75人丧生,目前南非金矿的开采深度均大于1500m,最深的西部深水平金矿采深接近4km,这是目前人类深入地壳内作业达到的最大深度。印度金矿的岩爆和矿震灾害与南非相近。加拿大的硬岩矿山目前开采深度几乎均达到1500m以下,岩爆和矿震灾害也很严重。

中国的冲击地压、岩爆和矿震,最早的报道始见于1933年辽宁省抚顺的胜利煤矿,虽然灾害出现较晚,但呈快速增长态势,由新中国成立初期仅在局部矿井发生逐渐演变为在深部开采矿井普遍显现,学术界和工程界对此开展了大量的研究和治理工作,奠定了指导生产实践的理论基础和应用技术,为采矿业和地下岩石工

程领域的安全作出了重要贡献。

虽然冲击地压、岩爆和矿震的震动强度和释放的能量不高,但其灾害分布广、发生频繁、与人类工程活动和人居环境密切接触,造成的人员伤亡、经济损失、工程损伤和社会影响较大,成为威胁深部资源开采的一大工程安全问题。

深部资源将成为我国 21 世纪以后的主要后备资源保障。例如,1980 年以来,我国煤矿平均开采降深速度约为 10 m/a。据 1995 年初对 599 处国有重点煤矿开拓参数的调查,未来最终开采深度小于 400 m 的浅矿井数目将大为减少,400~800 m 的中深矿井数目明显增加,800~1 200 m 的深矿井数目将成倍增加,并将出现更多超过 1 200 m 的特深矿井。随着浅部资源逐渐枯竭,我国的矿山将逐步转入深部开采,冲击地压、岩爆和矿震灾害更趋严重,个别矿井开采诱发的高强度矿震会对地面产生强烈震动,从而将有可能由采矿安全演化为公共安全问题。

## 第一节 冲击地压、岩爆和矿震的概念

表述采矿和地下岩石工程中产生的岩体快速破裂失稳并产生冲击、震动或声响等动力现象,学术刊物中使用的名称有煤炮、煤爆、冲击地压、冲击矿压、岩爆、矿山震动、矿山微震、采掘诱发地震、采矿诱发地震、开采诱发地震、矿震等,但大体上可归结为 3 类:将发生在煤矿煤层巷道掘进和采煤工作面的习惯称为冲击地压或冲击矿压,不论其发生在煤体中还是发生在顶底板的岩层中,其中将发生在煤体较深部位但可听到声响和感到轻微震动的现象称为煤爆或煤炮;将发生在硬岩工程和煤矿岩石巷道工程的称为岩爆;地震学将微震设备可观测到的岩体破裂归类为采矿诱发地震,简称矿震,但采矿与工程界更趋向于将发生在远离采场的强能量释放称为矿震,以区别那些没有产生明显冲击和震动的微震

事件。

有些学者认为,冲击地压、岩爆和矿震都是岩体的快速破裂失稳,并不存在力学本质上的区别,而将它们视为同类动力现象进行表述和讨论。多数学者认为,冲击地压、岩爆和矿震具有不同的发生和破坏机理,应区别对待。

《煤矿安全规程》将冲击地压和岩爆两个名词等同对待,定义为:冲击地压(岩爆),是井巷或工作面周围岩体,由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象。常伴有煤体抛出、巨响及气浪等现象。

为便于在本书中对煤岩动力现象的一致性表述,本书作者趋同“宏观上冲击地压、岩爆和矿震都是开采扰动产生的岩体快速破裂失稳,但微观上它们的发生和破坏机理不尽相同,研究和防治方法也存在显著差异”的观点。本书作者趋向于将发生在煤矿采煤工作面和煤层巷道掘进工作面,对采场造成猛烈形式破坏的煤岩动力现象称为冲击地压,其可发生在煤层,也可发生在煤层的顶底板岩层,以煤岩体的应变能释放形式为主,也有直接顶和基本顶的周期破断和直接底的冲击式破断;对发生在煤矿硬岩巷道掘进、硬岩矿山采掘和地下硬岩工程采场附近,以弹射、爆裂等猛烈形式破坏的岩体动力现象称为岩爆,以岩体的应变能释放形式为主;对发生在岩体深部、能量较高、往往对采场不构成直接破坏但可造成间接破坏的震动事件称为矿震,以断层运动和弯曲下沉带岩层大规模破断形式为主;而对微震设备可监测到弹性波的全部岩体快速破裂事件,可统称为采掘扰动岩体微震,简称为采动微震,其中包括冲击地压、岩爆、矿震和大量没有成为灾害的岩体破裂。采矿和地下岩石工程采掘扰动产生采动微震是确定性事件,但并非所有采矿和岩石工程的采动微震中都包含冲击地压、岩爆和矿震,有些采矿和岩石工程并未发生冲击地压、岩爆和矿震,有些可能只发生其中的一种或数种。

采矿工程的大量采动微震事件中,仅包含极少数冲击地压、岩爆和矿震。抚顺老虎台矿的统计资料显示,冲击地压仅占全部  $M_L \geq 0$  级 ( $M_L$ ——用直达体波计算的震级)采动微震事件的 3.35%,震级  $M_L$  绝大部分小于 2.0 级,分布在采场附近,对整个矿区尺度范围的影响不大,而  $M_L \geq 2.0$  级、可达矿震能量级别的事件仅占全部事件的 1.6%。门头沟煤矿的冲击地压仅占全部  $M_L > 1.0$  级采动微震事件的 0.5% 左右。各矿冲击地压所占采动微震的比例差异,可能是由于存在矿山结构等导致的系统因素,但也存在偶然因素。主要的偶然因素有:发生在无人区域的冲击地压没有统计到;由于采取防治措施减少了的冲击地压无法计算;各矿区的统计工作和防治措施存在差异。

采动微震中大量的事件并没有成为冲击地压、岩爆和矿震灾害,但这部分微震事件与冲击地压、岩爆和矿震的孕育及发生密不可分,它们对于判断采动岩体破裂规律、地下震源和传播路径介质的变化以及预测冲击地压、岩爆和矿震等具有重要的作用。

## 第二节 我国冲击地压、岩爆和矿震的总体分布

我国发生冲击地压、岩爆和矿震的煤矿广泛分布于大陆的东部,北起黑龙江,南至广西,总体呈 NE—SW 方向展布,与全国主要煤矿的分布基本吻合,大多数深部开采矿井都发生过冲击地压、岩爆和(或)矿震灾害。

非煤矿山发生岩爆和矿震的矿井,主要分布在湖南、云南、广西、贵州、辽宁等 1 000 m 以上的深部开采金属矿,四川盐矿、河北邢台尚旺庄石膏矿和山东枣庄市峰城石膏矿曾发生过矿震。抚顺红透山铜矿的开采已经进入地表以下 1 400 m,在中国金属矿山岩爆最为严重。四川自贡注水取盐诱发的矿震在中国采矿诱发的地震中强度最高。河北邢台尚旺庄石膏矿和山东枣庄市峰城石膏

矿塌陷造成的矿震较为典型。此外,在二滩、天生桥二级、拉西瓦、瀑布沟、太平驿等水电地下工程和川藏公路二郎山越岭隧道开挖硬岩中发生过岩爆。

我国最早的冲击地压报道始见于 1933 年抚顺胜利煤矿,但 1950 年前全国发生冲击地压的矿区仅见到报道 2 例,20 世纪 50 年代增加到 8 例,60 年代增至 14 例,70 年代增至 30 余例。80 年代后,全国范围矿井冲击地压和矿震灾害的报道快速增加。截至目前,作者见到的报道和了解到的情况,已有 120 余个煤矿(井)、20 余个非煤矿山曾发生和正在发生此类动力灾害(见图 1-1)。

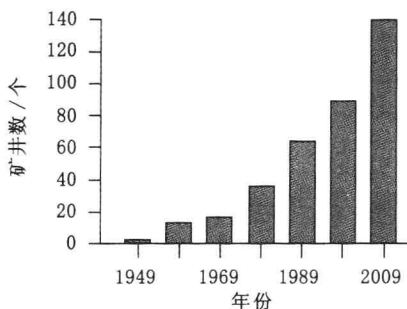


图 1-1 中国发生冲击地压、岩爆和矿震矿井数量累计分布

### 第三节 冲击地压、岩爆和矿震分区概述

#### 一、黑龙江省

鹤岗、鸡西和双鸭山矿务局,冲击地压和矿震灾害时有发生。监测区域天然地震的鹤岗地震台记录着鹤岗富力煤矿的采动微震活动,1998 年 7 月前使用 DD—1 型微震仪,1998 年 8 月后升级为

速度平坦型数字地震计(频带范围  $0.05 \sim 20$  Hz), 监测能力为  $M_L \geq 1.0$  级。1998 年 6 月以来矿震加剧, 1998 年 6 月 15 日~10 月 9 日井下记载到发生冲击地压 12 次, 其中鹤岗地震台记录到  $M_L$  为  $1.0 \sim 2.5$  级的微震事件 9 次。1998 年 6 月 15 日发生在 410 m 深度的  $M_L$  为 2.5 级的矿震, 造成人员伤亡和设备破坏, 该矿井在 1998 年 10 月 9 日后曾因矿震问题关闭。双鸭山岗东煤矿 1974 年开始发生冲击地压, 双鸭山地震台的地震观测记录显示, 2001 年 12 月~2003 年 10 月, 双鸭山矿区共发生采动微震 318 次。鹤岗振兴煤矿 1998 年 6 月 15 日在 -240 m 处(埋深 400 m) 发生冲击地压, 2000 年 7~10 月掘进和放顶煤回采期间, 用钻屑法判断冲击指数未达到临界指数, 但也发生了三次冲击地压。鹤岗南山煤矿、鸡西滴道煤矿亦有冲击地压发生, 但监测情况未见报道。

## 二、吉林省

辽源、舒兰、通化矿务局有发生冲击地压和矿震的报道。辽源矿务局地震台于 1979 年在距西安煤矿震中区 3 km 处架设 DD—1 地震仪, 采用单台方位角法定位, 1979~1984 年开采深度 500~600 m,  $M \geq 0.7$  级采动微震共发生 692 次, 最高震级为  $M = 1.9$  级( $M$ ——用面波计算的震级, 常用的换算公式为:  $M = 1.18M_L - 1.03$ ), 对井下采矿安全带来严重危害。他们的研究显示,  $M \geq 1.1$  级采动微震与天然地方震相关性较强, 采动微震应变能释放( $E^{1/2}$ )与地方震频次的相关系数为 0.985, 认为可作为预测天然地震的信息“窗口”。该矿到 2003 年发生冲击地压的工作面达 104 个, 造成人身事故 42 次, 个别工作面 1 个月发生采动微震和冲击地压 324 次, 冲击地压问题比较严重, 辽源矿务局和阜新矿业学院 1988 年对西安煤矿的冲击地压开展过系统研究。舒兰矿务局营城煤矿 1962 年 1 月开始发生冲击地压, 通化矿务局铁厂煤矿、辽源矿务局太信煤矿也发生过冲击地压, 但未见监测研究的报道。

### 三、辽宁省

辽宁省的冲击地压、岩爆和矿震灾害比较突出,不仅矿山蒙受巨大损失,而且强矿震对地表产生的震动影响到了公共安全。抚顺矿区、北票台吉煤矿、抚顺红透山铜矿的灾害震监测、研究和治理工作比较深入。

抚顺煤田位于抚顺市区南部,东西长 16 km,南北宽 2 km,地表投影面积 36 km<sup>2</sup>,为老第三纪煤系建造,煤田于 1901 年开采,沿煤田走向自西向东分别为西露天、胜利、老虎台和龙凤四个井(矿)田,地表海拔高程 80~86 m。西露天矿开采胜利矿井田的浅部煤层,没有发生过冲击地压。胜利矿 1933 年 1 月开采到 -225 m 水平时(埋藏深度约 300 m,有些文献误将开采水平当做埋藏深度)在我国最早发生冲击地压,当时防范措施较差,仅 1933~1935 年的 3 年间,冲击地压就造成 33 人死亡。老虎台和龙凤矿井田由一条 50 m 宽的煤柱分隔,老虎台矿 1950 年 1 月和龙凤矿 1975 年 1 月均在开采到 -225 m 水平时相继开始发生冲击地压。龙凤井田的冲击地压活动强于胜利井田,弱于老虎台井田,1950~1999 年间冲击地压造成 48 人死亡,1978 年 2 月 22 日该矿一次冲击地压就致 5 人死亡。胜利矿和龙凤矿已分别于 1979 年和 1999 年闭坑停采,采动微震活动也基本绝迹。抚顺煤田采动微震绝大多数发生在老虎台矿,目前该矿进入地表以下 900 m 深部开采,是抚顺煤田唯一存续的井工开采煤矿,设计年产量 300 万 t,预计开采期还将持续 20 a 左右。

冲击地压和矿震给抚顺老虎台矿造成严重的人员伤亡和经济损失。据不完全统计,1950~2003 年的 54 年间,冲击地压和矿震造成 67 人死亡,而其中 1989~2003 年的 15 年间,死亡 38 人,超过前 39 年的总和,反映出这一时期冲击地压和矿震活动水平的增强。2001 年 1 月 6 日和 12 日分别发生  $M_L=2.7$  级、 $M_L=2.8$  级

的矿震,造成 4 人死亡,28 人受伤,采区被迫关闭,设备未能运出,毁坏巷道 300 余米,20 万 t 优质煤炭不能采出,一次性直接经济损失超过亿元。1998 年以来, $M_L \geq 3.0$  级强矿震频发(图 1-2),在长期、反复、烈度相当于 5~6 度的地震动力作用下,场地遭到破坏,部分地面建筑物受到损伤。

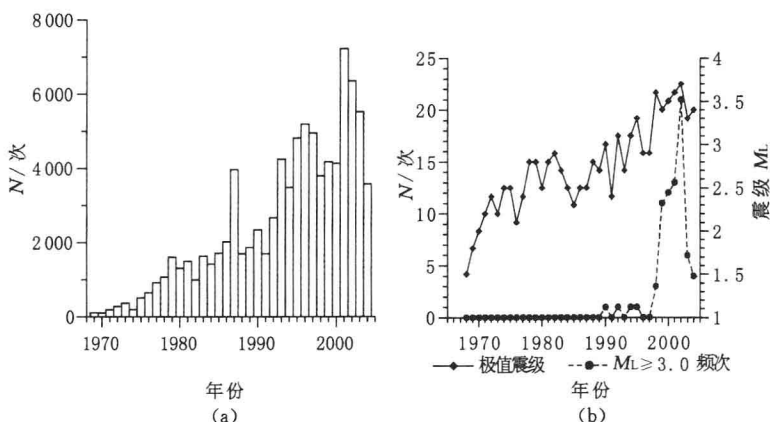


图 1-2 抚顺煤田采动微震时序分布图

(a)  $M_L \geq 0$  采动微震频次图; (b) 强矿震时序分布图

抚顺市地震部门 1968 年 12 月装备 3 台维开克地震仪,建立起可兼顾采动微震监测的地震台网,开始对抚顺煤田矿震进行连续监测。此后台网不断优化和调整,1987 年后陆续形成 4 个子台构成的测震台网格局,装备 573、DD—1、768 地震仪。2000 年 6 月~2002 年 7 月陆续升级为 JC—V100、JC—V104 数字地震计,建成 6 个子台组成的可兼顾采动微震监测的数字地震遥测台网。

1959 年林景云开展过抚顺胜利矿的冲击地压研究;1984 年,抚顺矿务局、龙凤矿和阜新矿业学院开展过“抚顺龙凤矿冲击地压成因规律、预测和防治”的研究;1994 年,煤炭科学研究总院抚顺



分院、抚顺矿务局和老虎台矿开展过“老虎台煤矿煤层突出危险性预测及防治措施”的研究;1995年,抚顺老虎台矿与沈阳煤炭科学研究所、阜新矿业学院开展过“老虎台煤矿岩体动力现象区域预测”的研究;2002年,抚顺矿业集团有限责任公司与煤炭科学研究总院抚顺分院开展过“虎台煤业分公司冲击地压的发生与防治”的研究。上述研究工作对抚顺煤田冲击地压和矿震防治工作起到了积极作用。

1999年开始,由北京科技大学、抚顺市地震局、抚顺老虎台矿和煤炭科学研究总院抚顺分院联合的科研团队,开展了“抚顺老虎台矿开采引发矿震”的研究;2000年,该研究团队接续开展了“抚顺矿震时间—空间—强度预测及其对城市危害性评价研究”;2001年以抚顺老虎台矿为主要研究对象,结合吉林海沟金矿、山东玲珑金矿深部开采已经和即将出现的问题,开展了“深部开采动力灾害预测及其危害性评价与防治”的研究。他们将采矿学、开采动力学、地震学和数值模拟相结合,开展了综合性的研究工作,进一步深化了对矿震规律的认识,提出了深部开采动力灾害本质上是由地应力主导的能量聚集与演化结果的理论,从系统的地应力测量、工程地质调查、岩石力学试验和现场监测资料的采集与分析入手,以能量聚集与演化为主线,揭示矿震发生的时间、空间和强度规律,建立了矿震预测的“开采扰动势”模型,揭示了矿震发生及其规模与开采量、开采深度、断层构造和应力环境的关系,为定量预测矿震的时间、空间、强度规律找到有效的途径;将预测和防治、地下和地面融为一体进行评价和研究。

2002~2007年,本书作者主持的国家自然科学基金项目两度得到支持,此期间并与中国地震局地球物理研究所李世愚主持的科技部项目合作,围绕抚顺矿区布设6个数字遥测子台构成的监测台网,监测下限  $M_L = -0.3$  级,  $M_L \geq 1.0$  级采动微震定位精度为  $\pm 130$  m,建成国内以高发矿震矿井为基地、功能比较完善的数